

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：22604
研究種目：基盤研究(A)（一般）
研究期間：2018～2021
課題番号：18H03799
研究課題名（和文）河川護岸の開削による震災湿地の水交換操作実験と物質循環・汽水生態系の応答解析

研究課題名（英文）Control of Water Exchange and its Effect on Material Budget and Estuarine Ecosystem in a Salt Marsh Formed by Tsunami Disaster

研究代表者
横山 勝英（YOKOYAMA, KATSUHIDE）
東京都立大学・都市環境科学研究科・教授

研究者番号：10347271
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,000,000円

研究成果の概要（和文）：気仙沼市舞根地区において、河川護岸の一部を開削して震災塩性湿地の水循環を変化させ、塩分濃度の変化が生態系に及ぼす影響を調査した。塩性湿地は仔魚の肥満度が河口域よりも高く、良好な餌料環境にあることが分かった。ベントス（貝類・甲殻類）は、水循環経路の切り替わりに応じて種組成が大きく変化し、生物多様性（種数と量）も工事完了後に増加した。湿地は河川へのリンや鉄の供給源になっている可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

河口汽水域は生態系にとって重要だが、塩性湿地の保全や復元は容易ではない。保全管理のための物理的・工学的側面からの研究が少ないことに加えて、河川区域外の利用は治水の面で問題になるからである。しかし、日本では耕作放棄地や所有者不明の土地が増加しているため、塩性湿地を復元することで物質循環や生態系サービスを改善・向上できれば、河口域を水産資源の基点として位置づけて「再開発」することが可能になる。

研究成果の概要（英文）：Saltmarsh emerged in Moune, Kesenuma City, after the 2011 earthquake. In this study, the water circulation in the saltmarsh was altered by excavating the river revetment, and the effects of the salinity changes on the ecosystem were investigated. It was found that juvenile fishes in the saltmarsh had higher fatness indices than those in the river mouth estuary, indicating that the saltmarsh was a favorable feeding environment. Benthos (shellfish and crustaceans) species composition changed significantly in response to the switch in water circulation pathways, and biodiversity (number and amount of species) increased after construction was completed. It was suggested that the saltmarsh is a source of phosphorus and iron to the river.

研究分野：環境水理学、河川水系における土砂・栄養塩動態と生態系の関連

キーワード：塩性湿地 塩分 水位 水質 生物多様性 東日本大震災 インパクトレスボンズ

1. 研究開始当初の背景

河口付近に形成される汽水性の湿地である「塩性湿地」は、他の水域と比べて高い生物多様性と一次生産力を示す。魚類や甲殻類、貝類などの水生動物だけでなく、植物や昆虫類、両生類や鳥類にいたるまで多くの生物が塩性湿地を成長・摂餌・繁殖の場として利用する。特に魚類は、水産重要種を含む多くの種が仔稚魚期を塩性湿地で過ごすため、初期成育場として河口～干潟～塩性湿地の環境が良好であれば成魚の数が増える。ニホンウナギに代表されるような川と海とを往来する魚種にとっても、通過・摂餌・成長のために不可欠の水域である。

沿岸域の干潟は約 40%が消失し、塩性湿地は現在約 30 箇所しか残っていない。塩性湿地は様々な生態系の基盤となることから、今後、環境復元や人為的再生の技術開発が必要になる。すなわち、貧酸素など水質環境の改善、底質や水深の最適化、河川と塩性湿地との連続性や多様な水辺空間（低流速域や多孔質の環境）の確保が重要である。しかし、環境改変と生物の応答を調べるような、生物と工学とを融合した研究はほとんど知見がない。さらに、沿岸の一次生産には栄養塩や鉄が必要不可欠であるが、湿地や地下水を経由した物質供給についても知見が不足している。

2. 研究の目的

申請者らの長期目標は、陸と海の結節点としての河口汽水域において、人間による適切な利用と生態系保全を両立することにある。その中でも特に多様性と生産性の高い「塩性湿地」を重視して、インパクト・レスポンスを解明し、再生・保全管理の方法論を提案しようと考えている。

今回の研究期間では、気仙沼市に新たに形成された塩性湿地を対象として、市役所や地元 NPO と協働して河川護岸の開削工事を行い、河川水・海水の交換率を任意に変化させる操作実験を行う。そして、水温、塩分、水位、地下水、栄養塩、微量金属、底質、ベントス（貝類・甲殻類）、仔稚魚、大型魚類の応答特性を調査する。水・物質収支は陸水と地下水の寄与を解析する。

3. 研究の方法

(1) 研究対象地の概要

研究対象地は宮城県気仙沼市舞根地区湿地である。西舞根川に隣接する農地が東日本大震災の津波による浸食作用を受け、さらに大陸プレートが 0.8m 沈下した影響で海面下よりも低くなり、海水が浸入する塩性湿地と化した。湿地の面積は 12,000 m² であり、西舞根川の河口から 160 m 上流地点にて直径 0.54 m の土管により接続している。

湿地と河川の水交換は土管 1 本のみで行われており、溶存酸素濃度 (DO) が低下し、生物多様性が低くなりがちであったことから、気仙沼市役所、地元の NPO 法人森は海の恋人と研究者グループが協議し、土管付近の河川護岸を延長 10 m にわたって開削した。

工事の履歴として、2019 年 2 月までは湿地と西舞根川が土管で接続していたが (図 1)、その後、西舞根川・東舞根川の護岸復旧工事の一環として塩性湿地と東舞根川を接続する導水路の建設が行われ、また塩性湿地と西舞根川を隔てる護岸が 2 か所開削された (表 1)。さらに、塩性湿地の一部を拡大する浚渫が行われた。



図 1 調査領域と工事概要

表 1 湿地工事の概要

期間	期間(日付)	工程
1	A 2018年6月13日 ~ 2018年9月20日	
2	B 2019年3月16日 ~ 2019年9月21日	東舞根川下流閉鎖
3	B 2019年9月21日 ~ 2019年12月4日	土管開削
4	D 2019年12月4日 ~ 2020年6月5日	東舞根川下流水止め撤去
5	C 2020年6月5日 ~ 2021年3月16日	西舞根川開削部から上流部閉鎖&上流水路設定
6	B 2021年3月16日 ~ 2021年4月1日	西舞根川上流部中流部水止め撤去&東舞根下流封鎖
7	B 2021年4月1日 ~ 2021年9月5日	新湿地深場開拓
8	D 2021年9月5日 ~ 2021年9月24日	東舞根川下流閉鎖解除
9	D 2021年9月24日 ~ 2021年10月20日	湿地入口土砂積み上げ

(2) 水質・底質調査

水位・塩分・水温・DOを西舞根川と湿地の接続地点、湿地の最深部および舞根湾にて10~20分間隔で測定した。測定は水位・塩分・水温を2012年から、DOを2018年から連続して行った。2020年から気温・雨量・PAR・風向風速を10分間隔で測定した。地形データは、河川・湿地・河口域では5mピッチの測量を実施し、さらに国土地理院のDEMデータも併用した。

底質は採泥後に塩酸抽出を行い、誘導結合プラズマ発光分光分析法(ICP-OES)により土壌中の鉄含有量を測定した。底質間隙水については分光光度法により溶存鉄(D-Fe)濃度を分析した。間隙水と湿地内の水中の鉄濃度を比較するために、採水した6測点については全鉄(T-Fe)及びD-Feを分光光度法により測定した。有機物との関係を考察するために、強熱減量も測定した。

(3) 地下水調査

塩性湿地内に5測点、舞根湾内に9測点、舞根湾外に1測点を設け、各測点で水温・塩分を測定するとともに水試料を採取し、地下水トレーサーである ^{222}Rn やRa同位体(^{223}Ra ・ ^{224}Ra ・ ^{226}Ra ・ ^{228}Ra)、溶存態無機窒素(DIN)、溶存態無機リン(DIP)、溶存ケイ素(DSi)濃度を測定した。河川水も分析するとともに、流速・断面積を別途測定して流量を算出した。また、端成分である再循環性地下水(RSGD)と淡水性地下水(FSGD)も塩性湿地や舞根湾の周辺から採取し、分析した。浅井戸に水位計を設置し、地下水位の連続測定を行った。塩性湿地のFSGD・RSGDの各量は、水・塩分・ ^{222}Rn のボックス収支モデルおよび ^{224}Ra のボックス収支モデルにより推定した。舞根湾のFSGD・RSGDの各量は、ダルシー則および ^{224}Ra の定常収支モデルで推定した。各起源からの栄養塩輸送量は水流入量に各端分の栄養塩濃度を乗じることで算出した。

(4) ベントス・仔稚魚の分布調査

湿地内に21地点を設けて定量調査を実施した。各地点にて水温、塩分、酸化還元電位(ORP)を測定した。底質を採取して酸揮発性硫化物(AVS)、強熱減量(IL)、泥分を測定した。埋在性ベントスから生物相(種類とその構成)を分析し、生物多様性指数を求めた。仔稚魚に関して、2ヶ月に一回の頻度で仔稚魚用の小型曳き網を用いて仔稚魚を採集し、種数と個体数を分析した。同時に動物プランクトンや水質も調べた。得られたサンプルの消化管内容物分析や安定同位体比分析も行った。

(5) 大型魚類の行動調査

大型魚類の広域的な回遊行動を調べるため、舞根湾でマアナゴとスズキを採捕した。これらの一部は胃内容物の同定を行い、残りの個体はバイオテレメトリー手法を用いて行動圏、活動時間、季節や潮位が活動に及ぼす影響について調べた。マアナゴの腹腔内に超音波発信機を装着して放流し、湾内外に設置した超音波受信機で活動を計測した。スズキにはタグを取り付け、深度、水温、遊泳速度、3軸加速度、目線映像データを取得した。また、行動圏内においてカメラを用いて海底を定期的に撮影することで、居穴性の甲殻類の巣穴密度を推定した。

4. 研究成果

(1) 河川護岸の開削

本研究のひとつ前の科研費基盤研究A(巨大地震により生じた湾奥部汽水域の環境再生機構の解明と環境価値の評価, 2013~2016)を通じて、気仙沼市役所、地元住民、NPO法人森は海の恋人と震災後の多自然川作りと塩性湿地の保全について、議論や協議を重ねてきた。これらの継続的な調査研究を通じて、ニホンウナギの発見、新種のスジエビの発見などが相次ぎ、塩性湿地の重要性が地元の方々にも認識された。

ただし、湿地の水交換は河川護岸によって遮られており、貧酸素状態になりやすかったため、護岸の一部を開削する工事を提案し、地元の了解が得られた。東舞根川では2019年3月に、西舞根川では9月に工事が行われた。河川護岸の撤去は堤内地に洪水を誘導することにつながるため、通常は認められないが、関係者のご尽力により実現できた。日本初の取り組みであり、本研究の大きな成果であるといえる。



図2 土管部分の開削(左)、本研究を通じて保全された塩性湿地の全景

(2) 水移動経路と湿地の塩分・DO

工事期間ごとに河川水・海水の移動経路が異なるため、9 ケースに分類した (表 1)。主に、工事实施前の閉鎖性が最も強かった期間 A(1), 東舞根川の河口が閉鎖されて、その河川水の全量が湿地に流入していた期間 B(2・3・6・7), 西舞根川の河口が閉鎖されて、その河川水の全量が湿地に流入していた期間 C(5), 水が自由に移動する期間 D(4・8・9)に分けられる。期間 A では、降雨後に塩分成層が形成されて湿地の貧酸素化が進行した。期間 B では、潮汐や降雨の影響を受けて淡水と海水が頻繁に入れ替わり、海水の流入時に DO の日変動が激しくなった (図 2)。期間 C では、湿地内は淡水環境であり、平常時の DO は飽和状態で降雨時に低下した。期間 D では、小潮や降雨時に表層の塩分が低下して、塩分成層が形成されると DO が低下し、大潮時に飽和状態まで回復した。DO と各水質パラメータとの関係を重回帰分析により調べた結果、全期間において日照時間の増加が DO の増加に寄与していた。また、期間 A・D では、降水量の増加が、期間 B では湿地水温の上昇が、期間 C では表層底層塩分差の減少が湿地深場の DO の減少に寄与していた。以上より、塩性湿地の塩分・DO は河川水・海水の流入経路や、開削部の石積み堰の 10cm 程度の高低差によって大きく変動することが分かった。

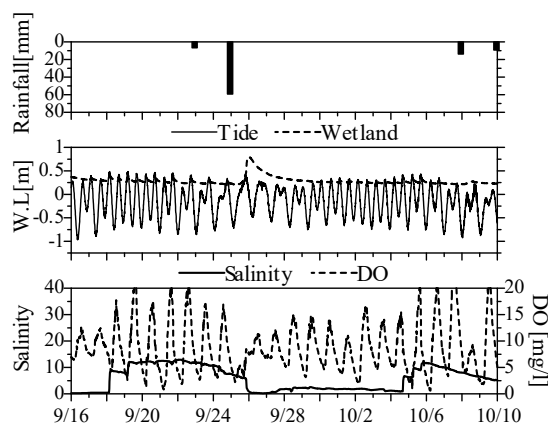


図 3 水位・塩分・DO の時系列(2020 年・期間 5)

(3) 湿地からの鉄供給

2019 年については、西舞根川の土管から離れるにつれて、湿地底泥および間隙水の鉄含有量が高くなった。2020 年に関しては、2019 年と同じ傾向を示す地点と、そうでない地点に分かれた。2020 年は 2019 年に比べて海水の流出入量が大幅に増えた時期であったため、湿地内の水の流れ(流動)が大きく変化した。海水の出入口に近い 4 地点では鉄濃度が低く、距離が離れるほど流れの影響が弱くなり、最も影響が弱い地点では底質からの鉄溶出が水中の鉄濃度を高めていると考えられる。有機物に関して、特に 2019 年は鉄含有量と有機物量の傾向が概ね一致しており、鉄は有機態鉄として溶出しやすい可能性が示唆された。

河川・湿地・湾の関係性について、湿地開削部 (A) は東舞根川 (C) より T-Fe 濃度が約 4 倍高く、西舞根川河口 (B) 東舞根川より 2.5 倍以上高いことから、湿地が西舞根川及び舞根湾への鉄供給源となっていることが示唆された。

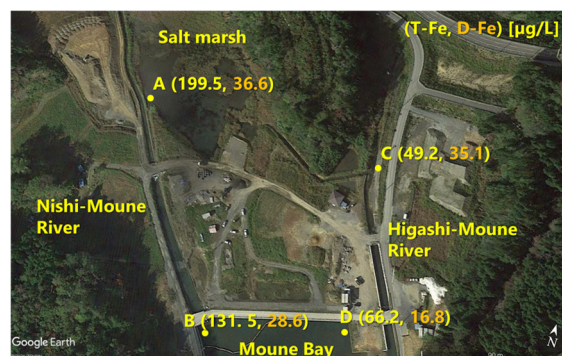


図 4 河川と湿地の鉄濃度

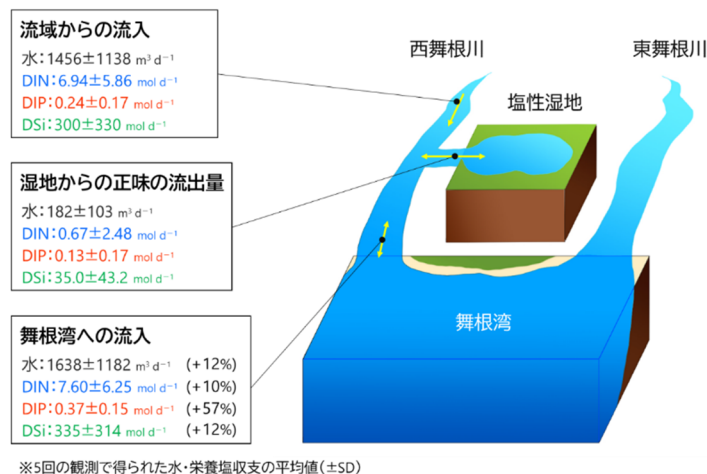


図 5 塩性湿地を介した沿岸域への栄養塩輸送

(4) 地下水による栄養塩輸送

舞根湾全体の水・物質収支として、湾外水の流入量は舞根湾の水収支において 99.4%以上を占め、海水輸送が支配的であった。一方、栄養塩量に関して、湾外から流入する DIN, DIP, DSi 量は平均 86%, 97%, 84%であり、海水輸送の貢献度は低下し、陸水輸送も重要であることが分かった。陸起源の栄養塩輸送量に対する地下水(淡水性+再循環性)の割合を算出すると DIN, DIP, DSi で、平均 88%, 85%, 58%を占め、陸水の中でも地下水(特に再循環性地下水)が重要な栄養塩輸送経路であることが判明した。

塩性湿地の水・物質収支として、淡水性地下水は塩性湿地へ流入する水の平均 22%を占めていた。塩性湿地へ流入する栄養塩量に対して、地下水が輸送する DIN, DIP, DSi 量は平均 83%, 56%, 51%を占め、地下水が塩性湿地への主要な栄養塩供給源となっていた。

また、湿地より上流の西舞根川における水・栄養塩輸送量と、湿地下流側のそれを比較した。その結果、西舞根川から舞根湾に正味輸送される淡水、DIN、DIP、DSi量は、湿地が途中にあることでそれぞれ12%、10%、57%、12%増加していた(図5)。よって、流下過程における塩性湿地の存在は、隣接する沿岸域への栄養塩ソースとしての役割(特にリン)を果たしていることが認められた。

ただし、陸水全体(西舞根川・東舞根川の表流水、および淡水地下水・再循環地下水)による栄養塩輸送量の合計に占める湿地由来栄養塩の割合は1.4%以下となり、舞根湾では再循環性地下水の栄養塩輸送量が大きいため、それと比べると小さい結果となった。

(5) ベントス・仔稚魚の変遷

工事期の物理環境に応じて、生物相(種類とその構成)が大きく変化していた(図6)。生物多様性(Shannon-Wiener指数)は、工事前と比べてIV期には増加しており、今後、さらに時間が経過すると多様性が増してゆく可能性がある。

河川水が多く導入された段階では湿地内の貧酸素状態は改善された。一方、河川水導入量が多く海水遡上が制限された段階では塩分が低下し、それに伴ってカイアシ類を主とする動物プランクトン群集およびイサザアミの密度は著しく低下した(図7)。安定同位体比分析では、海水遡上が制限された時期にはイサザアミやそれを摂食するマハゼ等の $\delta^{13}\text{C}$ 値が低い傾向にあった。これは、湿地内の食物源としての海洋性植物プランクトンの寄与率が下がったことに起因すると考えられる。一般に塩性湿地の貧酸素状態改善のためには水交換率を上昇させる対策が講じられることが多いが、それは魚類の餌環境に大きな影響を与えることが確認された。よって、貧酸素解消と餌環境の向上を両方意識して環境管理を進める必要がある。

(6) 大型魚類の行動

採集したマアナゴ21個体のうち、8個体から胃内容物が得られ、その湿重量の78%がテッポウエビなどの居穴性甲殻類であった。甲殻類の巣穴密度は0~23.1個/ m^2 であり、秋季(11~1月)に高くなる傾向があった。放流個体から受信があった期間は 234.8 ± 140.4 日(平均±標準偏差)であった。巣穴密度とデータの受信回数は有意に相関した(図8)、巣穴密度が高い場所ほど受信回数が多くなる傾向にあった。受信回数は、秋季(11~1月)と冬季(2~4月)に特に多くなっていたことから、マアナゴは餌の現存量が多い場所ほど長く滞在し、餌が多くなる時期に活動時間が長くなることが示唆された。

舞根湾で採捕されたスズキは、湾外の大川にまで移動し、河川を遡上していることが明らかになった。加速度データから1日あたりのエネルギー消費量を推定したところ、湾内個体より大川に遡上した個体の方が消費量が高い値となった。また、活動時間割合では、湾内個体は80%以上の時間を休息していたが、河川遡上個体は30.2~52.4%となり、活動割合が高い結果となった。

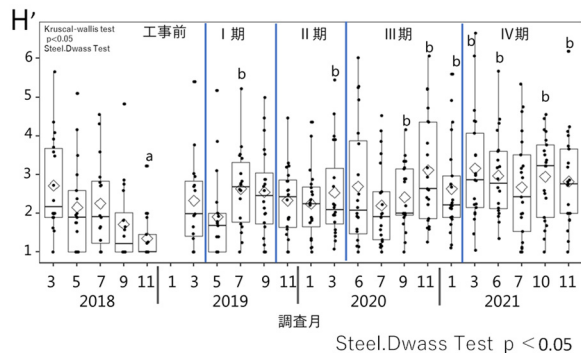


図6 工事に伴う生物多様性指数の変化

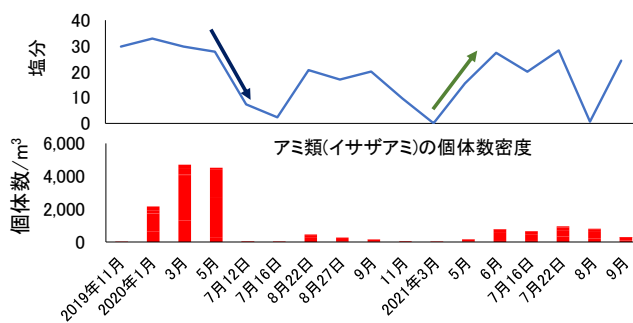


図7 塩性湿地の餌環境としてのアミ類の変化

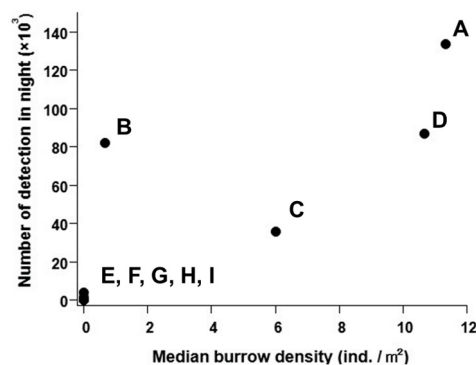


図8 巣穴密度と超音波受信回数の関係

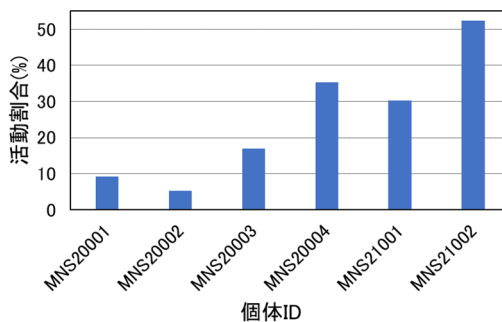


図9 スズキの活動時間割合(左3つは湾内、右3つは河川遡上)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakajima Toshimi, Sugimoto Ryo, Kusunoki Takahiro, Yokoyama Katsuhide, Taniguchi Makoto	4. 巻 66
2. 論文標題 Nutrient fluxes from rivers, groundwater, and the ocean into the coastal embayment along the Sanriku ria coast, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Limnology and Oceanography	6. 最初と最後の頁 2728 ~ 2744
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/lno.11785	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 MATSUSHITA Kazuma, YOKOYAMA Katsuhide, NAKAYAMA Kouji, HATAKEYAMA Makoto	4. 巻 76
2. 論文標題 TEMPORAL VARIATION OF SALINITY AND DISSOLVED OXIGEN IN A SALTMARSH FORMED AFTER THE GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)	6. 最初と最後の頁 I_27 ~ I_32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.76.5_I_27	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto, M., Liu Dan, Fukushima, K., Yokoyama, K.	4. 巻 233
2. 論文標題 The influence of freshwater from terrestrial sources on the concentrations of iron in Kesenuma Bay, Japan, after the 2011 tsunami, Estuarine	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Coastal and Shelf Science	6. 最初と最後の頁 106408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecss.2019.106408	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計31件（うち招待講演 6件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 木村 俊介, 尾崎 友輔, 若狭 達也, 畠山 信, 田中 克, 中山 耕至
2. 発表標題 塩性湿地における溶存酸素量の変化がチチブとピリンゴの分布および成長に与える影響
3. 学会等名 2021年度日本魚類学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩本健人, 畠山信, 佐藤克文
2. 発表標題 宮城県気仙沼市舞根湾におけるスズキの採餌行動に見られた特徴的な深度変化
3. 学会等名 令和3年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 一ノ瀬 友博	4. 発行年 2021年
2. 出版社 慶應義塾大学出版会	5. 総ページ数 228
3. 書名 生態系減災 Eco-DRR	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	千葉 晋 (Chiba Susumu) (00385501)	東京農業大学・生物産業学部・教授 (32658)	
研究分担者	杉本 亮 (Sugimoto Ryo) (00533316)	福井県立大学・海洋生物資源学部・教授 (23401)	
研究分担者	板川 暢 (Itagawa Satoru) (00773566)	鹿島建設株式会社(技術研究所)・地球環境・バイオグループ・研究員 (92604)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山本 光夫 (Yamamoto Mitsuo) (30361512)	東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・准教授 (12601)	
研究分担者	佐藤 克文 (Sato Katsufumi) (50300695)	東京大学・大気海洋研究所・教授 (12601)	
研究分担者	中山 耕至 (Nakayama Kouji) (50324661)	京都大学・農学研究科・助教 (14301)	
研究分担者	劉 丹 (Ryu Tan) (60390530)	有明工業高等専門学校・創造工学科・教授 (57102)	
研究分担者	一ノ瀬 友博 (Ichinose Tomohiro) (90316042)	慶應義塾大学・環境情報学部（藤沢）・教授 (32612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関